

利用黄土沉积速率与粒度的相关性 建立黄土序列年龄的新方法

刘晓东 鹿化煜 安芷生

摘要 基于黄土沉积速率与粒度的相关性提出了一种通过求解代数方程组而确定黄土地层年龄的新方法。以洛川剖面为例,用该方法确定了其S1顶部至S2底部深度-年龄的转换关系,与SPECMAP高分辨率的深海氧同位素记录的对比表明了该方法在确定黄土序列年龄上的有效性。

关键词 黄土 沉积速率 粒度 深度-年龄转换

第一作者简介 刘晓东 男 34岁 研究员 从事气候变化与气候模拟研究

A New Method of Determination of Loess Sequence Age with the Correlation between Sedimentation Rate and Grain Size

Liu Xiaodong^{1,2} Lu Huayu² An Zhisheng²

1(Lanzhou Institute of plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000)

2(State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710054)

Abstract

On the basis of linear correlation between loess sedimentation rate and grain size, a new method of establishment of loess sequence age was developed. In this method, we assume that there is a linear relationship between the loess sedimentation rate R and the grain size S at the same horizon in a loess sequence, that is, $S=aR+b$, where a and b are coefficients awaiting determination. Supposing that the loess between two time control points is divided into n layers. the depths of which are indicated by h_1, h_2, \dots, h_n and the time t_1, t_2, \dots, t_n , respectively, a system of equations can be established by proceeding.

$$f_i(t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n, a, b) = 0 \quad i=1, 2, \dots, n, n+1, n+2$$

in which t_1, t_2, \dots, t_n, a and b are unknown numbers. As this is a system of special nonlinear algebraic equations, which consists of $n+2$ equations, its numerical solution will be obtained with a iteration method. In this way, we can carry out a transformation from depth to age for a loess sequence. As an example, the depth-age transformation in the Luochuan loess section

from the top of S1 to the bottom of S2 was processed with the new method. The comparison between the results from the above example and deep-sea oxygen isotope records of SPECMAP shows that the new method is reliable and effective in determining loess-oil sequence age.

Key words loess sedimentation rate grain size depth-age transformation

中国黄土 - 古土壤序列是第四纪全球变化, 特别是东亚古季风气候变迁的良好记录〔1, 2〕, 而确定黄土地层的年龄是利用黄土记录研究古气候变化的基础和关键。以前的工作已通过堆积量或沉积速率内差〔1, 3〕、磁化率差分模式〔4〕、轨道调谐〔5〕, 以及最近提出的依据沉积速率与粒度相关性设计的年龄模式〔6~8〕建立了黄土序列的年龄, 然而这些方法或者分辨率太低, 或者物理意义不够明确, 或者数学处理过于简化, 因而都有其不同程度的局限性。在本文中我们将利用沉积速率与粒度具有相关性思想, 提出一种通过求解代数方程组而确定黄土地层年龄的新方法, 最后给出将该方法用于洛川剖面S1~S2一段以确定深度 - 年龄转换的实例。

1 方法

风尘堆积黄土的粒度〔2, 5, 7~10〕可以作为反映东亚冬季风气候变化的一个良好替代指标, 过去的研究〔2, 11, 12〕表明, 冬季风的强弱与其搬运粗颗粒物质的能力及黄土沉积速率存在一定的正相关关系。因此在本方法中首先假定某个层位上的沉积速率R与该层位某个粒级上的粗颗粒含量S成线性相关关系, 即

$$S=aR+b \quad (1)$$

这里a, b为待定系数。这一假定具有明确的物理意义。冬季风越强, 风搬运粗颗粒物质的能力也越强, 故大气中粗颗粒物质的浓度越高, 因而在相应的黄土沉降区的沉积速率越大, 记录在沉积物中粗颗粒物质的含量也越高。

不失一般性, 在一个黄土 - 古土壤序列中, 假设已知两个年龄控制点上的深度分别为 h_0 和 h_n , 以对应的古地磁年龄 t_0 和 t_n 分别作为时间控制点, 在 h_0 和 h_n 之间有 $n-1$ 个采样点, 已知其深度分别为 h_1, h_2, \dots, h_{n-1} , 而对应于这些深度上的时间 t_1, t_2, \dots, t_{n-1} 是需要求解确定的。同时所有采样点在研究粒级上的颗粒含量可以由实验方法获得, 即对应于上述 $n+1$ 深度(包括 h_0 和 h_n)处的S值(S_0, S_1, \dots, S_n)也是已知量(图1)。

$$\begin{array}{ccc}
 h_0 & \frac{\Delta h_1 = h_1 - h_0}{\Delta h_2 = h_2 - h_1} & S_0 & \frac{\Delta t_1 = t_1 - t_0}{\Delta t_2 = t_2 - t_1} & t_0 \\
 h_1 & & S_1 & & t_1 \\
 h_2 & & S_2 & & t_2 \\
 & & \vdots & & \vdots \\
 h_{n-2} & \frac{\Delta h_{n-1} = h_{n-1} - h_{n-2}}{\Delta h_n = h_n - h_{n-1}} & S_{n-2} & \frac{\Delta t_{n-1} = t_{n-1} - t_{n-2}}{\Delta t_n = t_n - t_{n-1}} & t_{n-2} \\
 h_{n-1} & & S_{n-1} & & t_{n-1} \\
 h_n & & S_n & & t_n
 \end{array}$$

图1 黄土地层采样点深度h、时间t以及粒度含量S对应关系示意图

Fig.1 Schematic of the relationship between depth h, age t, and grain size S of loess sample points

为书写方便，以下记两个年龄控制点之间的总沉积厚度及所占有的时间分别为 $H=h_n-h_0$ ， $T=t_n-t_0$ ，每两个相邻采样点之间的厚度差，对应的时间差以及平均粒度含量分别为

$$\begin{aligned} h_i &= h_i - h_{i-1} \\ t_i &= t_i - t_{i-1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\bar{S}_i = (S_i + S_{i-1}) / 2 \quad i=1, 2, \dots, n$$

由沉积速率的定义

$$\bar{R}_i = \frac{\Delta h_i}{\Delta t_i} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中 \bar{R}_i 为 h_i 与 h_{i-1} 两个相邻采样深度之间的平均沉积速率。另由(1)式得到 $\bar{S}_i = a \bar{R}_i + b$ ，代入(3)式并经整理可得

$$\bar{S}_i t_i - h_i a - t_i b = 0 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

同理，在 h_0 与 h_n 之间由(1)式 $\bar{S} = a \bar{R} + b$ ，并利用(3)式 $\bar{R} = H / T$ 得

$$H a + T b - \bar{S} T = 0 \quad (5)$$

式中 \bar{S} 为 h_0 与 h_n 之间的平均粒度含量

$$\begin{aligned} \bar{S} &= (\bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \dots + \bar{S}_n) / n \\ &= \left(\frac{S_0}{2} + S_1 + S_2 + \dots + S_{n-1} + \frac{S_n}{2} \right) / n \end{aligned}$$

同时注意到

$$t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1} + t_n = T = 0 \quad (6)$$

将(4)、(5)、(6)式联立即构成如下以 t_1, t_2, \dots, t_n 及 a, b 为未知量的 $n+2$ 个方

程组成的一组非线性代数方程组：

$$f_i(t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n, a, b) = 0 \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, n+1, n+2$$

方程组左端的具体形式是：

$$f_1 = \bar{S}_1 - t_1 - h_1 a - t_1 b$$

$$f_2 = \bar{S}_2 - t_2 - h_2 a - t_2 b$$

$$\dots \dots$$

$$f_n = \bar{S}_n - t_n - h_n a - t_n b \quad (8)$$

$$f_{(n+1)} = t_1 + t_2 + \dots + t_n - T$$

$$f_{(n+2)} = H a + T b - \bar{S} - T$$

我们可以利用多变量的牛顿法对以上方程组进行数值求解。不难得到该方程组的Jacobian矩阵J为：

$$J = \begin{vmatrix} \bar{S}_1 - b & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 & 0 & -\Delta h_1 & -\Delta t_1 \\ 0 & \bar{S}_2 - b & 0 \dots 0 & 0 & 0 & 0 & -\Delta h_2 & -\Delta t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \dots \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \dots 0 & \bar{S}_{n-1} - b & 0 & 0 & -\Delta h_{n-1} & -\Delta t_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & \bar{S}_n - b & 0 & -\Delta h_n & -\Delta t_n \\ 1 & 1 & 1 \dots 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 & 0 & -\Delta H & \Delta T \end{vmatrix}$$

注意到以上J矩阵的特殊性，很容易利用主元消去法，通过解线性代数方程组，求得n+2个未知量的迭代增量，最终可直接获得各个量的迭代关系式：

$$a^{(k+1)} = a^{(k)} + \frac{\Delta T \left(\sum_{i=1}^n \frac{f_i^{(k)}}{\bar{S}_i - b^{(k)}} - f_{n+1}^{(k)} \right) + f_{n+2}^{(k)} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i^{(k)}}{\bar{S}_i - b^{(k)}}}{\Delta T \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{\bar{S}_i - b^{(k)}} - \Delta H \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i^{(k)}}{\bar{S}_i - b^{(k)}} \right)}$$

$$b^{(k+1)} = b^{(k)} + \frac{\Delta H \left(\sum_{i=1}^n \frac{f_i^{(k)}}{\bar{S}_i - b^{(k)}} - f_{n+1}^{(k)} \right) + f_{n+2}^{(k)} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{\bar{S}_i - b^{(k)}}}{\Delta H \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i^{(k)}}{\bar{S}_i - b^{(k)}} - \Delta T \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{\bar{S}_i - b^{(k)}}}$$

$$\Delta t_i^{(k+1)} = \Delta t_i^{(k)} + \frac{\Delta h_i (a^{(k+1)} - a^{(k)}) + \Delta t_i^{(k)} (b^{(k+1)} - b^{(k)}) - f_i^{(k)}}{\bar{S}_i - b^{(k)}}$$

$i = 1, 2, \dots, n$

以上各式中，变量的上标(k)和(k+1)表示迭代次数， $f_i^{(k)}$ 由(8)式计算。这样，给定a、b及 t_i 的起始值，通过迭代计算即可获得方程组(7)在一定计算误差范围内的解。在我们讨论的实际问题中方程组的解经常是存在的，而且通常情况下迭代收敛的速度很快。在所有相邻的时间控制点之间均可利用上述方法定出其间各个层位的年龄，最终可以得到整个黄土地层序列的时间标尺。

2 实例

以具有代表性的陕西洛川剖面为例，利用鹿化煜等〔10〕测量的粒度数据，我们对上述方法进行了检验。参考过去有关黄土年代标尺的工作〔4, 5, 10〕，取S1顶部和S2底部的年龄分别为73 ka和250 ka，作为两个比较确定的时间控制点。仿Vandenberghe〔8〕等的作法，以黄土层颗粒44~16 μm 与16~5 μm 粒极上百分含量的比值，再进行标准化处理(即计算距平百分率)后的数值作为本文所用的粒度指标(以下简称粒度)。

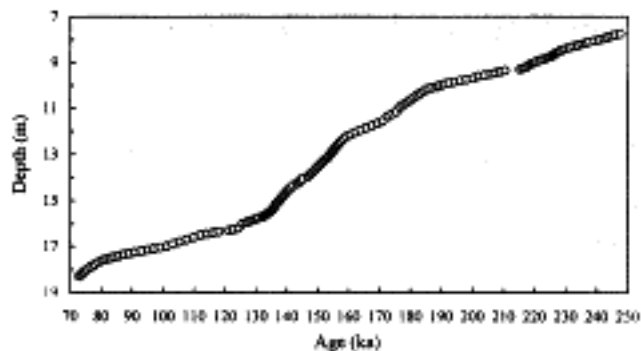


图2 洛川剖面S1顶部至S2底部深度 - 年龄图

Fig.2 Depth/Age plot for Luochuan loess section from the top of S1 to the bottom of S2

首先由(9)式迭代计算出各个样品深度上的年龄(图2)。实际计算时,先对以上粒度资料在深度坐标下作了高斯滤波,虽然滤波后的值与原值相差甚微,但却可以消除原始数据中极个别异常点的影响。另外对两个年龄控制点之间的平均粒度值 $\bar{\sigma}$ 作了适当订正,以使最终计算获得的沉积速率与粒度之间的线性相关达到最高。在由此获得的年龄框架下,可进一步算出各深度处的沉积速率(图3),它与粒度的变化几乎完全吻合,这正说明了本例数值求解的正确性。

为了检验以上获得年龄的正确性,我们将此年龄框架下的粒度变化与SPECMAP〔13〕高分辨率的深海氧同位素变化进行了对比。图4给出利用三次样条函数插值得到的具有相同时间间隔的黄土粒度与深海 ^{18}O 随时间的变化。显然两者存在良好的负相关关系,即黄土粒度的大小与深海氧同位素所反映的全球冰量的多寡在很大程度上是线性相关的,这也说明由本文提出的方法完成的上述黄土序列深度 - 年龄转换是成功的。

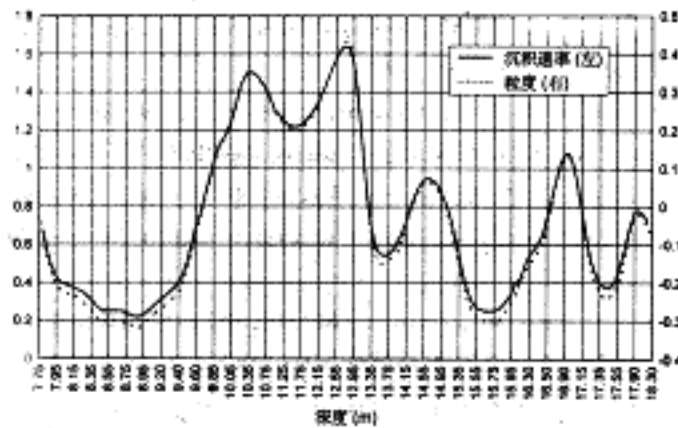


图3 由迭代计算的年龄推算的沉积速率与粒度随深度的变化

Fig.3 The sedimentation rate calculated according to the age determined with the method in the text and grain size against depth

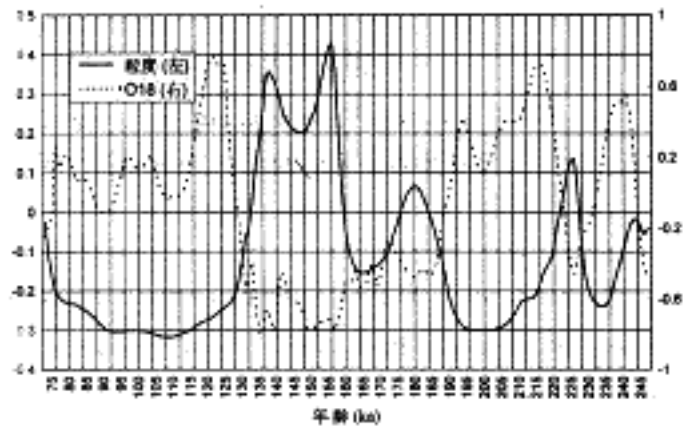


图4 在本文获得的年龄框架下的粒度与深海氧同位素的对比(深海 ^{18}O 资料取自文献〔13〕)

Fig.4 Comparison between the loess grain size with the age obtained in the text and SPECMAP deep-sea ^{18}O records (^{18}O data were taken from reference〔13〕)

3 结语

基于沉积速率与粒度的相关性，我们提出了一种通过求解代数方程组而确定黄土地层年龄的新方法。利用洛川剖面S1~S2一段的实例计算表明了该方法在确定黄土序列年龄上的有效性。然而，在该方法能够得以推广应用之前，利用更多的资料作进一步的检验是必要的，选用什么样的粒度指标，如何确定合适的时间控制点等也需要进一步探讨。从原理上讲，该方法同样可以用于深海沉积。

本文由中国科学院“九五”重大研究项目“亚洲季风变迁与全球变化”及国家攀登项目(95-预-40)资助

作者单位：刘晓东 中国科学院兰州高原大气物理研究所 兰州 730000；

鹿化煜 安芷生 刘晓东 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室
西安 710054

参考文献

- 1 刘东生, 黄土与环境.北京: 科学出版社, 1985.191~207
- 2 An Zhisheng, Liu Tungsheng, Lu Yanchou, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China. *Quaternary International*, 1990, 7/8: 91~95
- 3 Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits, *Geophysical Journal*, 1984, 77: 125~141
- 4 Kukla G, An Z S. Loess stratigraphy in central China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*. 1989, 72: 203~223
- 5 Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, Liu T S. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposit.

Quaternary Science Reviews,1994,13:39 ~ 70

6 安芷生, Porter S C,Chappell J等.最近130 ka洛川黄土堆积序列与格陵兰冰芯记录.科学通报, 1994, 39(24): 2 254 ~ 2 256

7 Porter S C,An Zhisheng.Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation .Nature,1995,375:305 ~ 308

8 Vandenberghe J,An Z,Nugteren G,Lu H, Huissteden K V.New absolute time scale for the quaternary climate in the Chinese loess region by grain-size analysis.Geology,1997,25:35 ~ 38

9 Xiao Jule,Zheng Hongbo, Zhao Hua.Variation of winter monsoon intensity on the loess plateau,central China during the last 130 000 years:evidence from grain size distribution.The Quaternary Research,1992,31:13 ~ 19

10 鹿化煜、安芷生.洛川黄土粒度组成的古气候意义.科学通报, 1997, 42(1): 66 ~ 69

11 Rea D K,Leinen M,Janecek T R.Geologic approach to the long-term history of atmospheric circulation. Science,1985,15:721 ~ 725

12 An Zhisheng,Kukla G,Proter S C,et al.Late Quaternary dust flow on the Chinese loess plateau.Catena.1991,18:125 ~ 132

13 Martinson D G,Pisias N G,Hays J D,et al.Age datation and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300 000 yr chronostatigraphy.Quaternary Research,1987,27:1 ~ 29

收稿日期: 1997-11-19 收修改稿日期: 1998-06-03

利用黄土沉积速率与粒度的相关性建立黄土序列年龄的新方法

作者: 刘晓东 鹿化煜, 安芷生, Liu Xiaodong, Lu Huayu, An Zhisheng
刘晓东, Liu Xiaodong (中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州, 730000; 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安, 710054), 鹿化煜, 安芷生, Lu Huayu, An Zhisheng (中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安, 710054)

刊名: 沉积学报 

英文刊名: ACTA SEDIMENTOLOGICA SINICA

年, 卷(期): 1999, 17(1)

被引用次数: 9次

参考文献(13条)

1. 刘东生 黄土与环境 1985
2. An Zhisheng; Liu Tungsheng; Lu Yanchou [The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China](#) 1990
3. Heller F; Liu T S [Magnetism of Chinese loess deposits](#) 1984
4. Kukla G; An Z S [Loess stratigraphy in central China](#) 1989
5. Ding Z L; Yu Z W; Rutter N W; Liu T S [Towards an orbital time scale for Chinese loess deposit](#) 1994
6. 安芷生; Porter S C; Chappell J [最近130 ka洛川黄土堆积序列与格陵兰冰芯记录](#) 1994(24)
7. Porter S C; An Zhisheng [Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation](#)[外文期刊] 1995
8. Vandenberghe J; An Z; Nugteren G; Lu H, Huissteden K V [New absolute time scale for the quaternary climate in the Chinese loess region by grain-size analysis](#) 1997
9. Xiao Jule; Zheng Hongbo; Zhao Hua [Variation of winter monsoon intensity on the loess plateau, central China during the last 130 000 years: evidence from grain size distribution](#) 1992
10. 鹿化煜; 安芷生 [洛川黄土粒度组成的古气候意义](#) 1997(01)
11. Rea D K; Leinen M; Janecek T R [Geologic approach to the long-term history of atmospheric circulation](#)[外文期刊] 1985
12. An Zhisheng; Kukla G; Proter S C [Late Quaternary dust flow on the Chinese loess plateau](#) 1991
13. Martinson D G; Pisias N G; Hays J D [Age datation and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300 000 yr chronostatigraphy](#) 1987

引证文献(9条)

1. 陈一萌, 冯兆东, 宫辉力 [对黄土磁化率、粒度年龄模型的检验](#)[期刊论文]-自然科学进展 2007(6)
2. 李斌, Reidar Lovlie, 苏朴, 樊行昭 [山西襄汾大柴更新统剖面划分的新观点](#)[期刊论文]-地球物理学报 2008(4)
3. 陈一萌, 陈兴盛, 宫辉力, 李小娟, 魏明建 [对黄土磁化率、粒度年龄模型的检验\(自检\)](#)[期刊论文]-地理研究 2006(3)
4. PENG Shoutao, LI Zhong, HUANG Baochun, LIU Tao, WANG Qingchen [Magnetostratigraphic study of Cretaceous depositional succession in the northern Kuqa Depression, Northwest China](#)[期刊论文]-科学通报(英文版) 2006(1)
5. 彭守涛, 李忠, 黄宝春, 刘涛, 王清晨 [库车坳陷北部白垩系磁性地层划分](#)[期刊论文]-科学通报 2005(19)
6. 刘冬雁, 李巍然, 彭莎莎, 王玲 [粒度分析在中国第四纪黄土古气候研究中的应用现状](#)[期刊论文]-中国海洋大学学报(自然科学版) 2010(2)
7. 徐树建 [黄土高原西部风成沉积物粒度特征与沙漠进退](#)[学位论文]博士 2005
8. 舒强 [苏北盆地兴化钻孔近3Ma环境变化记录研究](#)[学位论文]博士 2004
9. 陈一萌 [末次冰期气候不稳定性黄土记录探讨](#)[学位论文]博士 2004